

板栗贮藏失水过程对淀粉及其加工特性的影响研究

张时馨^{1,2}, 耿阳阳^{1,2*}, 刘亚娜^{1,2}, 胡伯凯^{1,2}, 王纪辉^{1,2}, 何佳丽^{1,2}, 梁美^{1,2},
谭化美^{1,2}, 罗玉梅³, 陈中爱⁴

(1. 贵州省核桃研究所, 贵阳 550005; 2. 贵州省林业科学研究院, 贵阳 550005;
3. 贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵阳 550025; 4. 贵州省生物技术研究所, 贵阳 550006)

摘要: **目的** 探究板栗贮藏失水过程对淀粉和加工特性的影响。**方法** 以贵州‘仓更’板栗为原料, 测定板栗贮藏失水过程中总淀粉、直链、支链淀粉含量和相关酶活性的变化; 采用扫描电镜、红外光谱和 X 射线衍射分析板栗原粉和淀粉结构差异; 通过糊化性质和流变特性评估其加工特性。**结果** 失水后板栗淀粉酶活性变化导致淀粉含量显著降低($P < 0.05$), 且板栗原粉中直链淀粉-脂质复合物增加, 淀粉分子有序结构减少导致淀粉结构稳定性变差; 淀粉糊化温度升高及黏弹性下降表明板栗淀粉的加工特性与贮藏失水有关。**结论** 板栗淀粉酶活性的上升, 淀粉水解及结构的变化与板栗失水密切相关并改变其加工特性。

关键词: 板栗; 贮藏; 淀粉; 加工特性

Study on the effect of dehydration on starch and processing characteristics of chestnut during storage

ZHANG Shi-Xin^{1,2}, GENG Yang-Yang^{1,2*}, LIU Ya-Na^{1,2}, HU Bo-Kai^{1,2}, WANG Ji-Hui^{1,2}, HE Jia-Li^{1,2},
LIANG Mei^{1,2}, TAN Hua-Mei^{1,2}, LUO Yu-Mei³, CHEN Zhong-Ai⁴

(1. Guizhou Institute of Walnut, Guiyang 550005, China; 2. Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China;
3. School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, 550025, China;
4. Guizhou Institute of Biotechnology, Guiyang 550006, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of dehydration on starch and processing characteristics of chestnut during storage. **Methods** Guizhou ‘Cangeng’ chestnut were used to determine the total starch, amylose, amylopectin content and the changes of related enzyme activities during storage; and to compare the differences of structure of native chestnut starch and chestnut starch by scanning electron microscopy, infrared spectroscopy and X-ray diffraction, processing characteristics of chestnut starch were evaluated through gelatinization properties and rheological properties. **Results** The results showed that changes in chestnut amylase activity resulted the content of starch was significantly reduced after dehydration ($P < 0.05$), more amylose-lipid complexes were formed in native chestnut starch and the ordered structure of starch molecules decreased, resulting the starch structure stability showed

基金项目: 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础[2018]1093、黔科合基础[2020]1Y142)、贵州省科技创新人才团队项目(黔科合平台人才[2020]5003)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Guizhou Province (Qinkehe Jichu [2018]1093, Qinkehe Jichu [2018]1093), and the Sci-Tech Innovation Teams Project of Guizhou Province (Qinkehe Pingtai Rencai [2020]5003)

***通信作者:** 耿阳阳, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为木本粮油加工与应用。E-mail: 780797880@qq.com

***Corresponding author:** GENG Yang-Yang, Master, Assistant Professor, Guizhou Institute of Walnut, No.382, Fuyuan South Road, Nanming District, Guiyang 550005, China. E-mail: 780797880@qq.com

worse, gelatinization temperature increased and viscoelasticity decreased in starch indicated that the processing characteristics of chestnut starch were related to dehydration. **Conclusion** It shows that the increase of amylase activity, starch hydrolysis and the changes of starch structure are closely related dehydration and change its physiological quality and processing characteristics.

KEY WORDS: chestnut; storage; starch; processing characteristics

0 引言

板栗(*Castanea mollissima* Blume)是我国重要的“木本粮食”产品,果实营养丰富。由于其良好的适应能力和高度的耐逆特性,全国各地区种植和发展规划板栗产业规模逐年提高。受制于成熟时气温较高和采后处理不当,板栗采后贮藏过程中多因一定程度的失水而导致板栗感官品质发生变化,其最直观的特征是板栗仁发白、质地坚硬、不利于加工食用,民间称之为“石灰化”^[1]。已有研究表明,贮藏失水后的板栗,淀粉酶活性显著上升、淀粉分解、蔗糖含量增高^[2-3]、热稳定蛋白分解^[4]、活性氧代谢失调、细胞膜结构发生过氧化、细胞渗透性增加^[1,5-6]。这些有关板栗贮藏失水的研究报道主要集中在营养物质含量、生理代谢和淀粉结晶等方面,仍不能完全反映出板栗贮藏失水过程中的主要淀粉含量和淀粉酶活性,淀粉糊化和流变等加工特性的变化规律及主要机制。

淀粉是板栗的重要组分,在贮藏过程中极易受到失水影响,其含量和结构变化对板栗果实品质和加工品质具有重要影响。梁建兰等^[7]研究发现板栗贮藏后淀粉糊的凝沉加快;冻融稳定性、透明度下降,稳定性变差。徐娟等^[8]在比较不同品种板栗淀粉含量与糊化特性时表明淀粉的糊化特性与直链淀粉含量及自身的遗传特性密切相关。但对于板栗淀粉在贮藏失水过程中的变化规律及其对加工品质的影响仍不清楚,从而导致了板栗在贮藏及加工过程中质量受到了影响,限制了板栗资源的开发利用。因此,本研究主要以贵州‘仓更’板栗为原料,跟踪板栗在贮藏失水过程中的淀粉含量和相关酶活性的变化,借助扫描电镜、红外光谱和 X 射线衍射等技术手段探究板栗原粉和淀粉结构差异,并通过糊化性质和流变特性来评估其加工特性,为进一步研究板栗贮藏失水过程淀粉含量和结构变化规律及制定板栗精深加工工艺提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集与处理

实验板栗:以黔产‘仓更’板栗为实验原料,采自贵州省黔西南州望谟县,树龄 8 年。待板栗苞转色开裂时采集并及时人工去除板栗苞,挑选大小一致、无机械损伤、无

虫蛀霉变的板栗种子置于智能人工气候箱下贮藏(温度 25 °C,相对湿度 70%),每隔 7 d 取样 1 次,进行实验分析。

1.2 仪器与试剂

BRPX-500 人工气候培养箱(济南博科控股集团有限公司); 3-18R 台式高速冷冻离心机(湖南可成仪器设备有限公司); LGJ-15E 振动冷冻干燥机(北京四环科学仪器厂有限公司); DSC250 差示扫描量热仪[梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司]; DHR-1 流变仪(美国 TA 公司); D8 Advance 型 X 射线衍射仪(德国 Bruker-AXS 公司); Nicolet 6700 傅立叶红外光谱仪(北京赛默飞世尔科技公司); EM-30 Plus 超高分辨率台式扫描电镜(北京欧波同光学技术有限公司); ETD-900M 磁控溅射仪(北京博远微纳科技有限公司); L55 紫外可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司)。

α 、 β -淀粉酶试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司); 氢氧化钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司); 溴化钾(分析纯,成都金山化学试剂有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 板栗原粉和淀粉的制备

板栗原粉:板栗去种皮后,研钵研磨,将研磨后的样品置于冷冻干燥机中-5 °C冻干 8 h,冻干后的样品磨粉备用。

板栗淀粉:板栗去种皮后,置于 0.05% NaOH 溶液中充分搅拌混匀,离心沉淀,倒掉上清液并去除沉淀表面蛋白质和脂类等物质,反复使用 0.05% NaOH 溶液溶解、离心,直至沉淀表面蛋白质和脂类等物质完全去除,将处理后的样品置于冷冻干燥机中-5 °C冻干 8 h,冻干后的样品磨粉备用。

1.3.2 淀粉类型和淀粉酶活性的测定

α 、 β -淀粉酶活性、直连、支链淀粉含量测定方法按照苏州科铭生物公司微量法试剂盒使用说明进行测定,实验重复 3 次。

1.3.3 扫描电子显微镜观察

将导电胶附着在直径 12.5 mm 的样品台上,分别将板栗原粉、淀粉粘附于导电胶表面,使用洗耳球将表面未粘附牢固的颗粒吹掉,溅射仪喷金镀膜处理后,将样品转移至扫描电镜中,在 20.0 kV 加速电压下对样品颗粒进行不同放大倍数的扫描观察。

1.3.4 红外光谱分析

参照 GENG 等^[9]的方法,略有修改。准确称取 2 mg 的板栗淀粉样品,将研磨后的溴化钾粉末与板栗淀粉样品以 100:1 (*m:m*)的比例在玛瑙研钵中混合均匀,使用压片机将混合粉末压片。在波长范围 4000~400 cm^{-1} 条件下进行测定,分辨率为 0.1 cm^{-1} 。所有光谱均经过基线校正并使用 EZ OMNIC 软件标准化。

1.3.5 X 射线衍射分析

参照 WU 等^[10]的方法,略有改动。板栗淀粉样品通过 D8 Advance 多晶 X 射线衍射仪获得 X 射线衍射图像,电压强度为 35 kV,电流为 30 mA, ($\lambda=1.54 \text{ nm}$),扫描强度(2θ)为 4~30°,扫描速度为 2°/min。相对结晶度为每个样品的尖锐峰面积与 X 射线光谱总面积的比值。

1.3.6 淀粉糊化特性分析

精准称取 3 mg 的板栗淀粉,分别与 6 μL 超纯水充分振荡后移入铝坩埚内密封,随后在室温下平衡 24 h。实验采用氮气吹扫,流速 20 mL/min。使用 DSC 250 差示扫描量热仪,加热程序为 25~120 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

1.3.7 流变特性分析

精准称取 0.50 g 的板栗淀粉,加入 9.5 mL 蒸馏水,玻璃棒搅拌均匀,随后 95 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 5 min 进行糊化,糊化过程不断搅拌,糊化后立即进行流变特性分析,流变特性分析参照刘越等^[11]的方法并做修改。剪切速率扫描:40 mm 平行板,设置间隙为 1000 μm ,剪切速率范围 10~1000 s^{-1} ,温度 25 $^{\circ}\text{C}$,稳态模式,每 10 倍频率取 10 个数据点,记录样品指标数据随剪切速率的变化。振荡温度扫描:40 mm 平行板,设置间隙为 1000 μm ,振荡模式,角频率 10.0 rad/s,温度变化范围 25~95 $^{\circ}\text{C}$,升温速率 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,平衡时间 60 s,每 10 s 取 1 个数据点,记录样品指标数据随温度的变化。

1.4 数据分析与处理

相关数据采用 Microsoft Excel 2016 软件进行整理,采用 Origin 2018 进行制图,SPSS Statistics 19.0 软件对数据进行显著性分析 ($P < 0.05$),最小显著性差异法 (least significant difference, LSD) 进行多重比较。

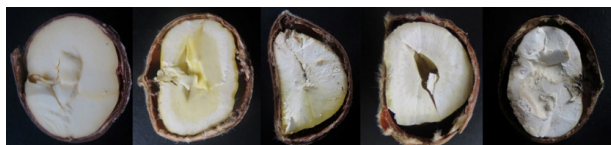
2 结果与分析

2.1 不同板栗淀粉含量及淀粉酶活性变化

板栗在不同贮藏时间里失水程度如图 1 所示,新鲜板栗仁呈乳白色,形状饱满,色泽均匀,与种皮紧密贴合。贮藏后第 7 d,板栗仁四周发白,与板栗壳明显分离,开始出现失水现象;从第 14 d 开始失水现象明显,随着贮藏天数的增加,失水程度逐渐加深,第 28 d 时已完全失水硬化。

不同贮藏时间板栗总淀粉、直链淀粉和支链淀粉含量变化如图 2 所示。在板栗贮藏失水过程中,总淀粉含量呈

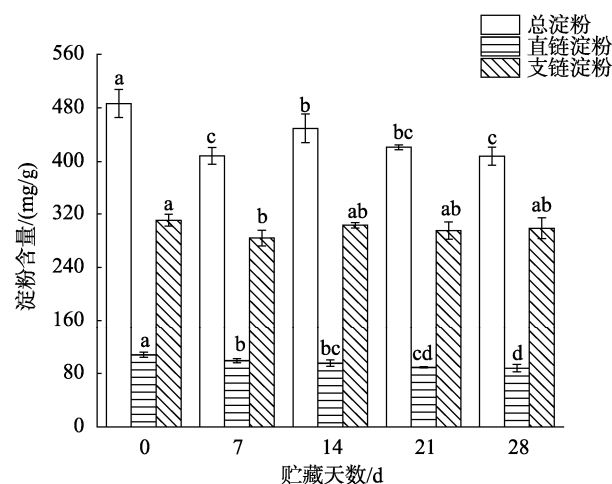
先下降后上升再下降的趋势,贮藏后第 28 d 时降低了 16.13%,虽在贮藏后第 14 d 淀粉含量有所上升,但是总体来看,所有发生失水后的板栗总淀粉含量均显著低于未失水的板栗 ($P < 0.05$)。支链淀粉含量的变化趋势与总淀粉含量变化相似,但在失水后期变化不显著 ($P > 0.1$)。直链淀粉含量随着失水程度的加剧,含量逐渐降低,这与总淀粉含量的降低趋势一致。推测与失水后期直链淀粉发生分子重新聚合,直链淀粉-脂质复合物的增加有关^[12]。



注:从左至右依次为贮藏第 0、7、14、21、28 d 板栗仁横切面。

图 1 板栗仁在贮藏失水过程中的变化

Fig.1 Changes of chestnuts at the process of dehydration



注:相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$),不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 板栗贮藏失水过程中淀粉含量变化 ($n=3$)

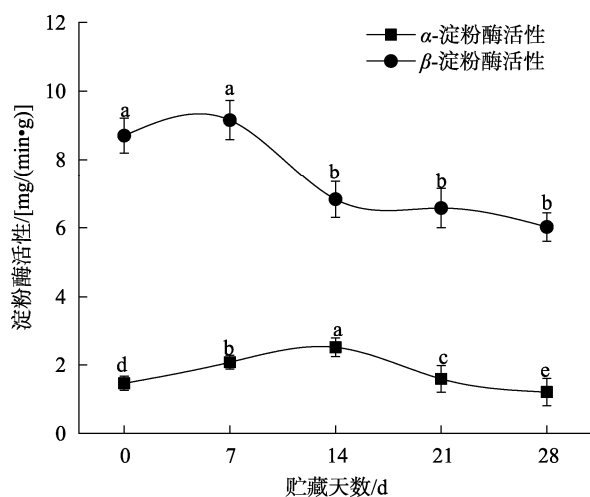
Fig.2 Changes of starch content in the process of dehydration ($n=3$)

如图 3 所示,板栗贮藏失水过程中 α -淀粉酶活性呈先升高后降低的趋势,贮藏第 14 d,活性增加了 71.87%,而 β -淀粉酶活性在贮藏第 7 d 活性最强,之后显著降低 ($P < 0.05$)。表明板栗在失水前期会诱导水解酶增强,但严重时水解作用受到抑制导致酶活性的降低^[1]。因此,在板栗贮藏失水前期,淀粉酶活性的增加导致淀粉水解,淀粉含量下降,随着贮藏时间延长,淀粉酶活性的下降进一步加剧了板栗的失水程度^[13]。

2.2 板栗粉超微结构

利用台式扫描电镜观察板栗贮藏失水前后的原粉和淀粉超微结构,如图 4 所示。板栗原粉中混合有淀粉和其

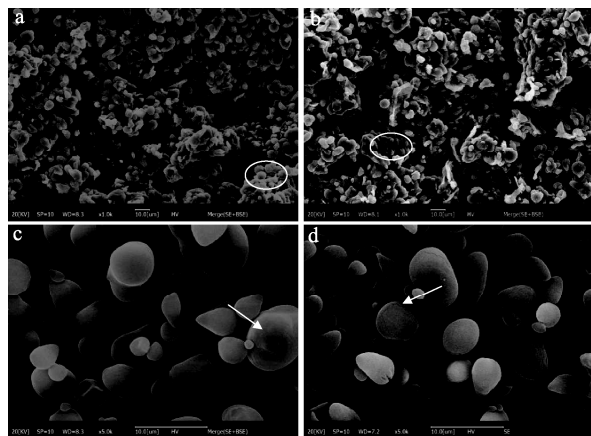
他细胞壁物质(蛋白质、磷脂等),失水前的板栗原粉中多数淀粉颗粒与细胞壁物质粘在一起,但仍然结构完整,清晰可辨;而失水后的板栗原粉中的部分淀粉颗粒与细胞壁物质紧密结合,甚至内陷到细胞壁组织中,且淀粉颗粒与细胞壁物质的结合体数量明显增多、体积增大。失水前,板栗淀粉颗粒呈椭圆形或梨形等不规则形状,且表面光滑无皱褶。由于淀粉颗粒内层是相对疏松的无定形区,而外层是致密的结晶区,当无定形区与结晶区螺旋结构之间结合力被破坏时,淀粉颗粒表面就会出现裂缝^[14]。失水后,板栗淀粉颗粒结构完整性遭到破坏,表面出现明显裂纹,表现出不同程度的损伤。



注: 相同小写字母表示差异不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 3 板栗贮藏失水过程淀粉酶活性变化($n=3$)

Fig.3 Changes of amylase activity in chestnutsat the process of dehydration ($n=3$)



注: a 为失水前板栗原粉, b 为失水后板栗原粉, c 为失水前板栗淀粉, d 为失水后板栗淀粉。

图 4 板栗原粉和淀粉的扫描电镜图像

Fig.4 Scanning electron micrographs of native chestnuts starch and chestnuts starch

2.3 板栗原粉红外光谱分析

使用 Nicolet 6700 傅立叶红外光谱仪测定板栗贮藏失水过程中的淀粉分子结构变化。如图 5 所示,不同失水程度的板栗淀粉在 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 波长范围内均具有相同的特征吸收峰。 $800\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 波长范围的吸收峰主要显示为葡萄糖吡喃糖环的骨架振动,而葡萄糖单元的骨架振动则主要反映在 $1500\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 波长范围内,在 1154 cm^{-1} 处的吸收峰反映了 C-O-C 的拉伸振动,而在 1080 cm^{-1} 处的吸收峰是由与仲羟基相连的 C-O 键的拉伸振动引起的^[15]。失水后的淀粉在该波长范围内的吸光值增加,推测与板栗淀粉水解相关。 1047 和 1022 cm^{-1} 处的吸收峰分别反映了有序和无定形区域的数量, $1022/995\text{ cm}^{-1}$ 吸光度比显示了晶体局部的双螺旋状态^[12,16]。而 1652 cm^{-1} 处的吸收峰与淀粉无定形区域中结合水的 O-H 振动有关^[17]。 $1047/1022\text{ cm}^{-1}$ 的比值减小, 1652 cm^{-1} 处吸收值和 $1022/995\text{ cm}^{-1}$ 比值增加,表明在失水后板栗淀粉中的有序结构和局部双螺旋结构减少。此外,在 2926 cm^{-1} 处出现的吸收峰和 3378 cm^{-1} 出现的极宽谱带也分别显示出了葡萄糖单元中 CH_2 基团的对称拉伸振动和淀粉分子中 O-H 键的拉伸振动。

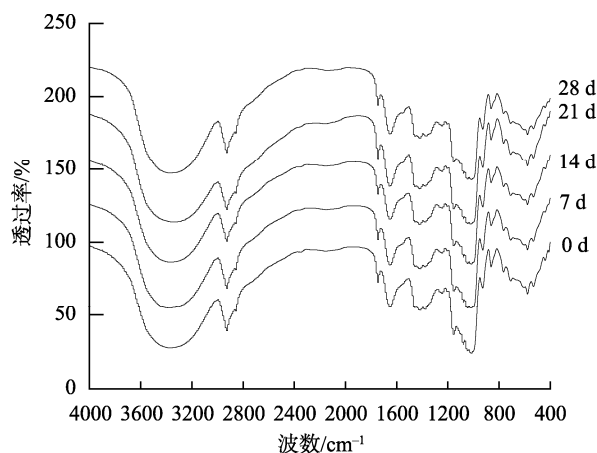


图 5 贮藏失水过程中板栗淀粉红外光谱图

Fig.5 Fourier transform infrared spectrum of chestnut starch at the process of dehydration

2.4 板栗淀粉 X 射线衍射

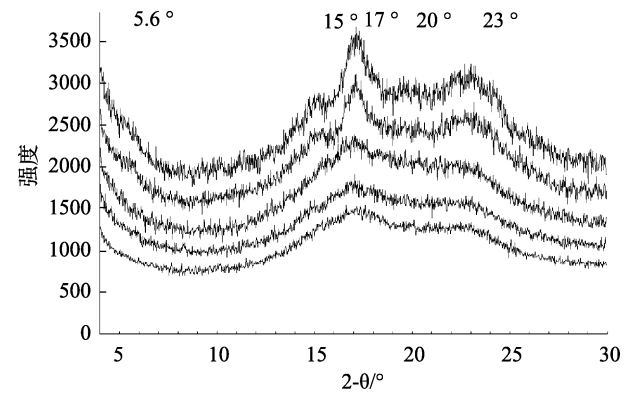
淀粉作为板栗的主要组成成分,其晶体结构类型与加工特性密切相关。如图 6 所示,板栗淀粉分别在 15° 、 17° 和 23° 位置出现较强特征衍射峰,属于典型的 C 型淀粉晶体类型。其中 5.6° 位置的特征峰不稳定,样品经过干燥处理后该峰可能消失^[18]。如图 6 所示,在板栗贮藏失水前期,在 5.6° 位置并未出现明显的特征衍射峰,其他衍射峰出现在原始位置,随着失水程度加深,可以观察到 5.6° 处衍射峰有所增加,无定形区向结晶区域转变。 20° 处衍射峰增加则表明生成了更多的直链淀粉-脂质复合物,结晶区域被

轻微破坏,但并未改变板栗淀粉的晶体类型^[19-20]。通过 Jade 6.0 软件计算 5 个样品的结晶度发现,随着失水程度的加深,结晶度呈下降趋势,这与贮藏失水后红外光谱检测结果一致。可能因板栗贮藏失水过程中内源淀粉酶的分解作用而导致淀粉的结构有序性遭到破坏,进而导致了相对结晶度下降^[21-22]。

2.5 板栗淀粉糊化特性分析

板栗贮藏失水过程中淀粉糊化特性参数见表 1。新鲜板栗淀粉的糊化起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)和糊化终止温度(T_c)分别为 58.60、72.99 和 76.40 °C,与 LIU 等^[23]对 4 种不同品种板栗的热特性值研究结果相似。与新鲜板栗淀粉相比,板栗失水后, T_0 、 T_p 和 T_c 均有升高(除了 T_c 第 14 d 略有下降),表明失水导致了结晶结构变化,淀粉颗粒中无序结构增加。此外,在失水过程中热焓值逐渐降低也表明淀粉内部晶体结构破坏,淀粉结构稳定性变差^[24],但在失水过程中 T_0 、 T_p 和 T_c 的变化结果无明显

差异,原因还有待进一步研究。



注:从上至下依次为板栗淀粉贮藏失水后 0、7、14、21、28 d 的 XRD 图谱。

图 6 板栗贮藏失水过程 X 射线衍射图谱

Fig.6 X-ray diffraction patterns of chestnuts starch at the process of dehydration

表 1 失水过程中板栗淀粉加工特性参数

Table 1 Processing property of chestnuts starch at the process of dehydration

贮藏天数/d	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$	相对结晶度/%	1047/1022 cm^{-1} 比值	1022/995 cm^{-1} 比值
0	58.60	72.99	76.40	126.75	45.9	1.102	0.928
7	77.43	79.16	86.79	116.02	45.2	1.024	0.954
14	66.20	74.24	74.76	119.44	41.2	1.043	0.951
21	79.75	88.36	107.98	107.17	40.0	1.035	0.938
28	78.60	78.60	113.08	76.18	38.6	1.026	0.963

注: T_0 表示糊化起始温度; T_p 表示峰值温度; T_c 表示糊化终止温度; ΔH 表示热焓值。

2.6 板栗淀粉流变学特性分析

不同贮藏失水程度板栗淀粉静态流变学特性如图 7 所示。同一温度下,不同失水程度板栗淀粉糊在流动过程中剪切应力随剪切速率的变化趋势相同(图 7a),剪切应力随剪切速率的增加而增加,曲线凸向应力轴,前期迅速上升,后趋于平缓,表现为假塑性流体特征^[25]。剪切稀化是假塑性流体的特有现象,表现为表观黏度随着剪切速率的增加而减小。由图 7b 可以看出,失水过程中板栗淀粉的剪切速率越快,表观黏度下降越快,表明板栗淀粉在贮藏失水过程中出现了剪切稀化现象。当淀粉凝胶状态受到破坏时,淀粉中的网状结构将不维持原有的网状结构而变成定向流动,因此导致剪切应力不断减小,表观黏度下降,表明失水破坏了板栗淀粉结构状态。这与燕麦淀粉^[26]研究结果一致。

不同贮藏失水程度板栗淀粉动态流变学特性如图 8 所示。通过不同温度扫描测定储能模量和损耗模量变化可以判断样品的弹性和黏性特征。从图 8 结果看出,不同失

水过程板栗淀粉储能模量与损耗模量变化趋势相似,在 25~60 °C 范围内相对稳定,从 65~95 °C,储能模量和损耗模量均迅速上升并达到最大值,且所有失水板栗的储能模量均高于损耗模量,表明板栗淀粉糊主要以弹性为主。此外,储能模量与损耗模量均随着温度的上升和失水程度的加深呈现先上升后下降的趋势,表明板栗淀粉在失水过程中的黏弹性均先增加后减弱,体系主要呈现固体特征^[27]。

3 结论与讨论

板栗对失水敏感,在贮藏过程中极易因失水出现板栗仁发白变硬的特征,且淀粉含量及特性极易受到影响。在板栗贮藏失水过程中 α -淀粉酶和 β -淀粉酶在失水后显著降低($P < 0.05$),并直接导致了淀粉含量下降,这种淀粉和酶活性的变化严重影响了板栗果实品质。同时,失水后淀粉的结构完整性遭到破坏,淀粉颗粒表面出现裂纹。红外光谱和 X 射线衍射图谱也表明淀粉分子中的有序结构和局部双螺旋结构减少,结晶区域被破坏,无

定形区增加, 淀粉结晶度下降。由此可见, 淀粉酶活性的上升, 淀粉水解及淀粉晶体结构的变化与板栗失水的发生密切相关。此外, 板栗贮藏失水后, 糊化温度升高, 表观黏度降低, 弹性增强, 这种黏弹性的变化虽降低了

板栗贮藏过程中的营养品质, 但在板栗烘焙和板栗营养粉等产品的加工过程中却可改善食用口感和消化性。因此, 板栗贮藏失水后淀粉加工特性的变化可为加工工艺的制定提供依据。

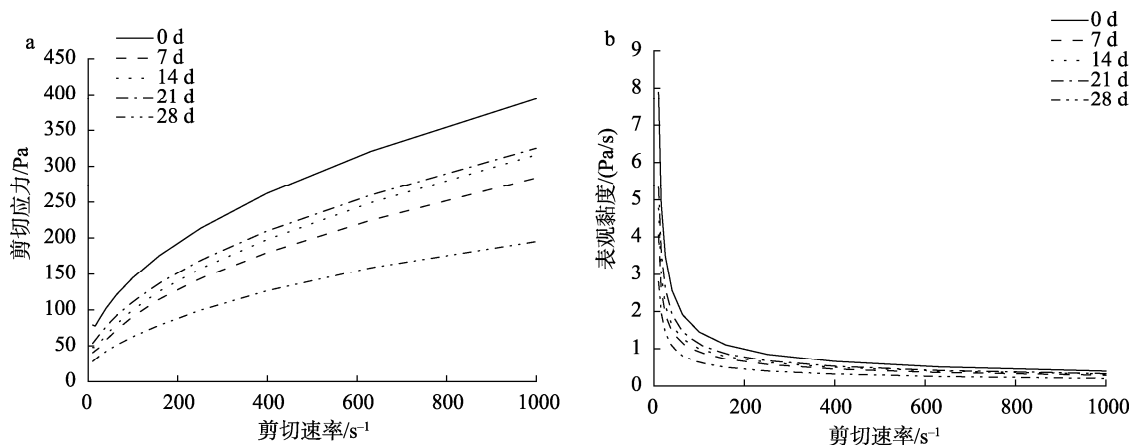


图 7 贮藏失水过程板栗淀粉静态流变曲线

Fig.7 Static rheological curves of chestnuts starch at the process of dehydration

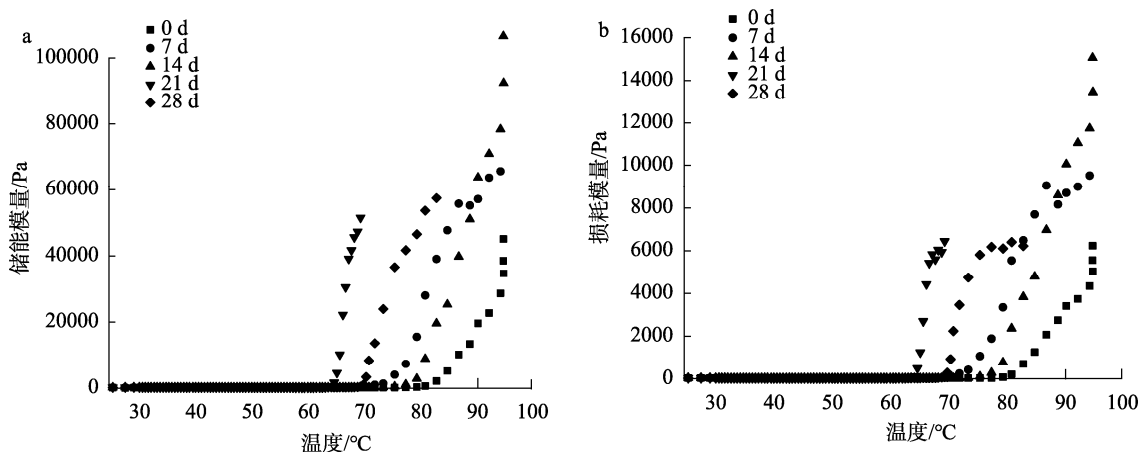


图 8 贮藏失水过程板栗淀粉动态流变曲线

Fig.8 Dynamic modulus versus temperature curves of chestnuts starch at the process of dehydration

参考文献

[1] 顾采琴, 张颖豪, 张倩, 等. 不同相对湿度对板栗“石灰化”及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 296-299.
 GU CQ, ZHANG YH, ZHANG Q, et al. Effect of different levels of relative humidity on calcification and reactive oxygen metabolism of Chinese chestnuts [J]. Food Sci, 2011, 32(20): 296-299.

[2] YANG B, JIANG GX, GU CQ, et al. Structural changes in polysaccharides isolated from chestnut (*Castanea mollissima* Bl.) fruit at different degrees of hardening [J]. Food Chem, 2010, 119(3): 1211-1215.

[3] 顾采琴, 赖雅平, 朱冬雪, 等. 不同石灰化程度板栗中淀粉代谢及蔗糖含量变化[J]. 中国农业科学, 2013, 46(8): 1676-1681.
 GU CQ, LAI YP, ZHU DX, et al. Changes of the metabolism of starch and sucrose content in chestnuts at different degrees of calcification [J]. Chin Agric Sci, 2013, 46(8): 1676-1681.

[4] BOUDET J, BUITINK J, HOEKSTRA FA, et al. Comparative analysis of the heat stable proteome of radicles of *Medicago trunculata* seeds during germination identifies late embryogenesis abundant proteins associated with desiccation tolerance [J]. Plant Physiol, 2006, 140(4): 1418-1436.

[5] WEN XL, GU CQ, ZHU DX, et al. Water stress affects on cell membrane lipid oxidation and calcification of chestnut (*Castanea mollissima* Bl.) [J]. Postharvest Biol Technol, 2017, 126: 34-39.

[6] 陶月良, 朱诚. 板栗种子成熟前后脱水敏感性与蛋白质、可溶性糖的关系[J]. 林业科学, 2004, 40(2): 45-50.
 TAO YL, ZHU C. Relationship among desiccation-tolerance, proteins and soluble sugars before and after maturation of *Castanea mollissima* seeds [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(2): 45-50.

[7] 梁建兰, 刘秀凤, 赵萌, 等. 板栗贮藏前后淀粉性质的比较[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(1): 51-54.

- LIANG JL, LIU XF, ZHAO M, *et al.* Starch property comparison of chestnut in pre-and post-storage [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2015, 30(1): 51–54.
- [8] 徐娟, 梁丽松, 王贵禧, 等. 不同品种板栗贮藏前后淀粉糊化特性研究[J]. *食品科学*, 2008, 29(2): 435–439.
- XU J, LIANG LS, WANG GX, *et al.* Study on pasting properties of chinese chestnut starch in different varieties pre and post-storage [J]. *Food Sci*, 2008, 29(2): 435–439.
- [9] GENG YY, ZHANG YX, LIU YN, *et al.* Quality attributes and microstructure of cell walls in 'suli' plum fruit (*Prunus salicina* Lindl.) during softening [J]. *Food Sci Technol Res*, 2020, 26(2): 281–292.
- [10] WU CS, ZHOU X, WEI BX, *et al.* Effects of α -maltotriohydrolase hydrolysis prior to debranching on the structure and digestibility of normal maize starch [J]. *Starch Stärke*, 2017, 69(3): 1–8.
- [11] 刘越, 谢勇, 刘琳, 等. 马铃薯全粉熟化度对马铃薯—小麦重组面团性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(22): 48–54.
- LIU Y, XIE Y, LIU L, *et al.* Effects of different cooking degrees of whole potato flour on the characterization of the recombinant potato-wheat dough [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(22): 48–54.
- [12] ZHAO JK, ZHANG YY, WU YW, *et al.* Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starch from naturally air-dried chestnut [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 117: 1074–1080.
- [13] 宋雯雯. 贮前温度对板栗石灰化和生理的效应分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- SONG WW. Effect of pre-storage temperature on fruit calcification and physiology of *Castanea mollissima* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [14] HU N, LI LN, TANG EJ, *et al.* Structural, physicochemical, textural, and thermal properties of phosphorylated chestnut starches with different degrees of substitution [J]. *J Food Proc Preserv*, 2020, DOI: 10.1111/jfpp.14457
- [15] WANG SJ, LI CL, COPELAND L, *et al.* Starch retrogradation: A comprehensive review [J]. *Comp Rev Food Sci Food Saf*, 2015, 14(5): 568–585.
- [16] WANG SJ, WANG JR, ZHANG W, *et al.* Molecular order and functional properties of starches from three waxy wheat varieties grown in China [J]. *Food Chem*, 2015, 181(15): 43–50.
- [17] BAO WJ, LI Q, WU YW, *et al.* Insights into the crystallinity and *in vitro* digestibility of chestnut starch during thermal processing [J]. *Food Chem*, 2018, 269(15): 244–251.
- [18] 赵瑾凯. 风干板栗的制备条件优化及其淀粉理化性质和体外消化性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- ZHAO JK. Optimization of processing air-dried chestnut and physicochemical properties and *in vitro* digestibility of its starch [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [19] HU N, GU X, LI LN, *et al.* Synthesis and evaluation of microstructure of phosphorylated chestnut starch [J]. *J Food Proc Eng*, 2014, 37(1): 75–85.
- [20] BAO Y, JIANG GX, PRASAD KN, *et al.* Crystalline, thermal and textural characteristics of starches isolated from chestnut (*Castanea mollissima* Bl.) seeds at different degrees of hardness [J]. *Food Chem*, 2010, 119(3): 995–999.
- [21] ZHANG WJ, CHEN HX, WANG J, *et al.* Physicochemical properties of three starches derived from potato, chestnut, and yam as affected by freeze-thaw treatment [J]. *Starch Stärke*, 2014, 66(3-4): 353–360.
- [22] CORREIA P, CRUZ-LOPES L, BEIRÃO-DA-COSTA L. Morphology and structure of chestnut starch isolated by alkali and enzymatic methods [J]. *Food Hydrocoll*, 2012, 28(2): 313–319.
- [23] LIU C, WANG SJ, CHANG XD, *et al.* Structural and functional properties of starches from Chinese chestnuts [J]. *Food Hydrocoll*, 2015, 43: 568–576.
- [24] FERRARI FMH, BERALDO AL, COSTA MS, *et al.* Physicochemical and structural properties of starch from young bamboo culm of *Bambusa tuldoidea* [J]. *Food Hydrocoll*, 2018, 87(2): 101–107.
- [25] 李志西, 张莉, 李巨秀. 板栗淀粉特性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2000, 28(4): 21–27.
- LI ZX, ZHANG L, LI JX. Physicochemical properties of chestnut starch [J]. *J Northwest A & F University (Nat Sci Ed)*, 2000, 28(4): 21–27.
- [26] 张晶, 张美莉. 超高压处理对燕麦淀粉颗粒特性, 热特性及流变学特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 114–121.
- ZHANG J, ZHANG ML. Effect of high hydrostatic pressure treatment on morphological, thermal and rheological properties of oat starch [J]. *Food Sci*, 2020, 41(23): 114–121.
- [27] OYEYINKA SA, SINGH S, MA Y, *et al.* Effect of high-pressure homogenization on structural, thermal and rheological properties of bambara starch complexed with different fatty acids [J]. *RSC Adv*, 2016, 6(83): 174–180.

(责任编辑: 于梦娇 王欣)

作者简介



张时馨, 硕士, 实习研究员, 主要研究方向为农产品贮藏加工。

E-mail: 1510208632@qq.com



耿阳阳, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为木本粮油加工与应用。

E-mail: 780797880@qq.com